

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 20720101150087

UDC\_\_\_\_\_

厦门大学

硕士学位论文

静电纺丝制备氧化铝纳米纤维

$\text{Al}_2\text{O}_3$  Nanofibers Derived from Electrospinning

赖德林

指导教师姓名: 余煜玺

专业名称: 材料学

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩日期: 2013 年 5 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013 年 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博士论文摘要库

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 前言 .....	1
1.1 氧化铝纳米纤维 .....	1
1.2 氧化铝纳米纤维的制备方法 .....	1
1.2.1 气相法.....	2
1.2.2 模板法.....	2
1.2.3 液相法.....	3
1.3 静电纺丝法 .....	4
1.4 溶胶凝胶结合静电纺丝制备氧化铝纳米纤维 .....	6
第二章 实验 .....	9
2.1 原料及设备 .....	10
2.2 异丙醇铝为铝源制备氧化铝纳米纤维 .....	11
2.2.1 AlOOH 溶胶的制备 .....	11
2.2.2 AlOOH 溶胶的静电纺丝 .....	11
2.2.3 含 SiC 氧化铝纳米纤维的制备 .....	13
2.3 硝酸铝为铝源制备氧化铝纳米纤维 .....	13
2.4 分析与测试方法 .....	13
第三章 结果与讨论 .....	16
3.1 异丙醇铝制备 AlOOH 溶胶 .....	17
3.1.1 AlOOH 溶胶制备 .....	17
3.1.2 溶胶分析 .....	21
3.2 PVA-A 纳米纤维的制备 .....	22
3.2.1 AlOOH 溶胶的纺丝 .....	22
3.2.2 PEO 为纺丝助剂纺丝 .....	23
3.2.3 PVP 为纺丝助剂纺丝 .....	24
3.2.4 PVA 为纺丝助剂纺丝 .....	25
3.3 PVA-A 纳米纤维 .....	30
3.3.1 热分析结果.....	30
3.3.2 PVA-GA 及 PVA-A 纤维元素含量分析 .....	31
3.3.3 不同热处理温度对纤维的形态的影响.....	32
3.3.4 不同热处理温度纤维的 FT-IR.....	34
3.3.5 不同热处理温度纤维的 XRD .....	35
3.3.6 不同热处理温度纤维的 TEM .....	37
3.3.7 不同热处理温度纤维的 XPS .....	38
3.4 PVA-AS 复合纳米纤维.....	41
3.4.1 PVA-AS 的制备 .....	42

3.4.2 SiC 含量对 PVA-AS 纳米纤维形态的影响.....	43
3.4.3 复合纤维的 FT-IR 图及 XRD 图 .....	44
<b>3.5 硝酸铝为铝源制备氧化铝纳米纤维 .....</b>	<b>47</b>
3.5.1 PVP 含量对 PVP-GA 成形的影响.....	47
3.5.2 PVP-GA 纳米纤维的热重 .....	48
<b>第四章 结论 .....</b>	<b>51</b>
<b>展 望.....</b>	<b>53</b>
<b>参 考 文 献 .....</b>	<b>55</b>
<b>附 录：硕士期间发表论文 .....</b>	<b>61</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>63</b>

## TABLE OF CONTENTS

<b>ABSTRACT IN CHINESE .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT IN ENGLISH.....</b>	<b>III</b>
<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 A brief introduction of alumina nanofibers.....	1
1.2 Method for fabricated alumina nanofibers .....	1
1.2.1 Vapor phase method .....	2
1.2.2 Template method .....	2
1.2.3 Liquid phase method.....	3
1.3 A brief introduction of electrospinning.....	4
1.4 Fabricated alumina nanofibers by electrospinning with Sol-Gel method .....	6
<b>CHAPTER 2 EXPERIMENT.....</b>	<b>9</b>
2.1 Materials .....	10
2.2 The alumina nanofibers from aluminum isopropoxide.....	11
2.2.1 Synthesis of AlOOH solution .....	11
2.2.2 The form of PVA-A nanofibers .....	11
2.2.3 The form of PVP-AS nanofibers.....	13
2.3 The alumina nanofibers from $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ .....	13
2.4 Analyzing methods.....	13
<b>CHAPTER 3 RESULTS AND DISCUSSION.....</b>	<b>16</b>
3.1 AOOH from aluminum isopropoxide .....	16
3.1.1 Synthesis of AlOOH Solution.....	17
3.1.2 Analysis of AlOOH solution .....	17
3.2 PVA-GA nanofibers .....	21
3.2.1 The electrospinning results of AlOOH solution .....	22
3.2.2 The electrospinning results of AlOOH/PEO solution.....	22
3.2.3 The electrospinning results of AlOOH/PVP solution .....	24
3.2.4 The electrospinning results of AlOOH/PVA solution .....	25
3.3 PVA-A nanofibers.....	30
3.3.1 The result of TG .....	30
3.3.2 The results of EDX .....	31
3.3.3 The results of SEM .....	32
3.3.4 The results of FT-IR.....	34
3.3.5 The results of XRD .....	35
3.3.6 The results of TEM .....	37
3.3.7 The results of XPS .....	38
3.4 PVA-AS composite nanofibers.....	41
3.4.1 The form of PVA-AS .....	42

3.4.2 The effects of SiC on the morphology of nanofibers.....	43
3.4.3 The FT-IR and XRD results of nanofibers.....	44
<b>3.5 PVP-A nanofibers .....</b>	<b>47</b>
3.5.1 The form of PVA-GA and PVA-A nanofibers.....	47
3.5.2 TG test of PVP-GA nanofibers .....	48
<b>CHAPTER 4 CONCLUSIONS .....</b>	<b>51</b>
<b>FUTURE WORK.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>55</b>
<b>APPENDIX .....</b>	<b>61</b>
<b>ACKONWLEDGEMENT.....</b>	<b>63</b>



## 摘要

本论文采用溶胶-凝胶法结合静电纺丝法合成了一系列的氧化铝纳米纤维。首先介绍以异丙醇铝（Aluminum Isopropoxide, AIP）为铝源，水为溶剂，硝酸为催化剂，在不同反应参数下，制备出一系列 AlOOH 溶胶。采取不同的纺丝助剂制得  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米纤维，进而将 SiC 添加到异丙醇铝制备的溶胶中，制备出 SiC/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合纳米纤维。以  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  为铝源，PVP 为纺丝助剂，通过静电纺丝制备出含铝的 PVP 复合纳米纤维，纤维热处理得到另一种  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米纤维。

第一部分为溶胶的合成部分及纺丝部分，对 AlOOH 溶胶制备过程的参数进行分析，得出适合纺丝的溶胶配比：异丙醇铝与水及硝酸的摩尔比分别为 1:110 和 1:0.05，最佳水解温度为 85 °C。将溶胶静电纺丝得到纳米微球，分别采用 PEO 和 PVP 作为纺丝助剂，静电纺丝得到复合微球，最后采用 PVA 作为纺丝助剂，静电纺得到 AlOOH/PVA 复合纳米纤维，纤维热处理后得到氧化铝纳米纤维。

第二部分为异丙醇铝为铝源形成的氧化铝纳米纤维部分，对 PVA 为纺丝助剂制备的 AlOOH/PVA 复合纤维纤维进行热重分析、红外光谱分析、X 射线衍射分析、扫描电镜分析，透射电镜分析、X 射线光电子能谱分析。结果表明：4%PVA/AlOOH 纺丝液制备的原始纤维，直径约 125 nm，热处理温度在 560 °C 以上时，PVA 完全分解，有机信息消失，纤维由 Al 元素和 O 元素组成，氧化铝纤维形成，氧化铝形态为  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。纤维在 900 °C 再次发生相转变，由  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  向  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  转变。1000 °C 热处理后的纤维由  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  及  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  组成，纤维平均直径为 60 nm。接着将  $\beta\text{-SiC}$  纳米粉末添加到 AlOOH/PVA 纺丝中，制备得到  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  复合纳米纤维，通过 XRD、FTIR、XPS、SEM 测试得出 SiC 已经引入到纤维中，纤维形态为节点-纤维-节点形式的复合纤维，SiC 含量增加，节点增多，节点的尺寸变大。

第三部分为  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  为铝源制备氧化铝纳米纤维部分，采取将  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  添加到 PVP 醇溶液中，制备出含铝的 PVP 乙醇可纺液，经过静电纺丝得到含铝的 PVP 复合纳米纤维，复合纤维经过 1000 °C 热处理后得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米纤维。

**关键词：** $\text{Al}_2\text{O}_3$ ；纳米纤维； 静电纺丝

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

This article aims to synthesize a series of aluminum oxide nanofibers under the different parameters, which adopted the sol-gel method and the electrospinning method. At first, the search showed that the reaction between aluminium isopropoxide and water in different parameters, which can produce a set of AlOOH sol. From the electrospinning, AlOOH sol gets alumina particles, while adopt the PEO or PVP as spinning additives, its got alumina composite microspheres, finally use PVA as spinning additives, the alumina/PVA composite nanofibers were formed. Then the alumina nanofibers were obtained by sintered at different temperatures. Composed with the way of AlOOH form alumina nanofibers, the PVA with SiC and AlOOH were synthesis from the SiC/AlOOH/PVA solution by electrospinning. Then SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofibers were formed. Add Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> to PVP/EtOH solution to form PVP nanofibers with Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, the alumina nanofibers were formed by electrospinning and heat treatment.

In the first part of the work, use aluminium isopropoxide as raw materials, a series of AlOOH solutions were obtained by Sol-Gel method. From the analysis, it can conclude that the best proportion of aluminum isopropoxide sol: the molar ratio of isopropanol aluminum to the water is 1 to 110, and the isopropanol aluminum to the nitrate is 1 to 0.05, the best hydrolysis temperature is 85 °C. It got alumina micropowders when the AlOOH or AlOOH/PEO or AlOOH/PVP solution through electrospinning, then, it got nanofibers when use PVA as electrospinning additives.

In the second part, alumina nanofibers from AlOOH/PVA solution were formed. Then the nanofibers were analyzed by using FT-IR、SEM、XRD、EDX、XPS、TG-DTA、TEM test. The results indicate that 4% PVA/AlOOH solution's spinning dope is most effective. When heat treatment temperature reach above 560 °C, PVA combust completely, and organic information disappeared, the nanofibers were composed of Al and O,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alumina nanofibers were obtained. However, when the heat treatment temperature increased to 1000 °C, the formed nanofibers were composed of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the average diameter of nanofiber is 60 nm.

With the same process of preparing the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofibers above, it was successfully to get  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$  composite nanofibers through added SiC nanopowders to the spinning solution. The produce was analyzed by XRD、FTIR、XPS and SEM test. The result showed that the nanofibers have contained SiC. The morphology of composite fiber was arranged in the way as fiber-node-fiber, and more SiC, there will be more nodes.

In The last part, the work focused on the syntheses of  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3/\text{PVP}$  composite nanofibers. Spinning fluid contained aluminum was produced by adding the  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  to the PVP alcohol solution directly. Through electrospinning,  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3/\text{PVP}$  composite nanofibers could be produced. Then the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofibers could be got after heat treatment at the temperature of 1000 °C.

**Keywords:** Alumina; Nanofibers; Electrospinning

## 第一章 前言

### 1.1 氧化铝纳米纤维 (Alumina nanofibers)

氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 纳米纤维是直径在 1~100 nm 之间的超细无机纤维, 通常由铝和氧两种元素组成, 是一种新型的陶瓷纤维<sup>[1]</sup>。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米纤维化学稳定性好, 可在酸碱环境、氧化还原和真空环境中使用, 在空气中可承受 1650 °C 以上的高温而保持完整的纤维形态不发生坍塌和变形<sup>[2]</sup>; 再者,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米纤维具有良好的热辐射能力, 是良好的红外辐射材料; 其次, 氧化铝纳米纤维具有极大的比表面积 ( $>1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) 和超高的表面积-体积比, 作为催化剂或催化剂载体时催化效果相当优越。

氧化铝纳米纤维在复合材料增强体、微电子、化工及宇航工业等高科技领域具有十分广阔的应用前景。

**1、增强基体领域的应用。**氧化铝纳米纤维可作为耐高温结构材料的弥散相, 以增强材料的强度、硬度。与传统的微米氧化铝纤维相比, 所用的氧化铝弥散相含量一定时, 纤维越细越长则纤维数越多, 而纤维间距也越小, 对增强材料性能的提高也越多, 所以氧化铝纳米纤维比传统的微米氧化铝纤维在增强基体方面具明显的优势<sup>[3]</sup>。

**2、微电子领域的应用。**多层电容器的电子陶瓷元件的厚度要求小于 10  $\mu\text{m}$ , 多层基片的厚度小于 100  $\mu\text{m}$ , 而且要有良好的物理结构, 常规的 1  $\mu\text{m}$  粉末或微米级纤维难以达到要求, 氧化铝纳米纤维具有超细、成分均匀、单分散的特点, 能满足微电子元件的要求<sup>[4]</sup>。

**3、催化剂及催化剂载体领域的应用。**氧化铝纳米纤维具有较大的比表面积、适度的孔分布和较好的机械强度等优点, 可满足催化剂的高选择性和高反应活性, 广泛应用于汽车尾气净化、催化燃烧、石油炼制等方面的催化剂及其载体<sup>[5-9]</sup>。

氧化铝纳米纤维继承了氧化铝纤维、氧化铝纳米粒子的优良性能, 同时还自己独特的优良性能<sup>[8-10]</sup>, 因此研究制备氧化铝纳米纤维具有十分重要的意义。

### 1.2 氧化铝纳米纤维的制备方法

相对于“零维”及“二维”纳米材料, 纳米纤维的制备比较困难。一般情况

下, 因应力作用, 分子和原子由气相或液相形成成固相时, 偏向于团聚形成纳米颗粒或者分散形成薄膜, 而不倾向于往一个维度方向进行生长而形成纤维, 所以制备直径小于 100 nm 的纤维比较困难。要形成氧化铝纳米纤维, 需要通过特殊的方法抑制分子或原子在其它两个维度的生长, 引导其沿着某一特殊的方向持续生长<sup>[11]</sup>。近年来, 已陆续发展出一系列制备氧化铝纳米纤维的方法, 主要有气相法、模板法、液相法, 静电纺丝法。

### 1.2.1 气相法 (Vapor phase method)

气相制备氧化铝纳米氧化铝纤维主要采用化学气相沉积, 以铝的单质、卤化物、氢化物或有机金属为原料, 通过气相加热分解和化学反应, 然后堆积形成氧化铝纤维。也可以根据 1964 年 Wagner<sup>[12]</sup>等提出的晶须气-液-固生长机制, 在制备氧化铝纤维的过程中, 采用原料先形成氧化铝共晶合金, 然后控制温度从共晶合金出析出氧化铝纳米纤维。气相法制备的纳米纤维结晶度好、表面光滑平直, 纤维直径细小<sup>[13]</sup>。但气相法制备纳米纤维条件非常苛刻, 需要在高温、特殊气氛或真空条件下进行, 生产效率低, 且生产成本昂贵, 产品只适合具有特殊用途的产品, 如尖端仪器用的单晶氧化铝纳米纤维。

### 1.2.2 模板法 (Template method)

模板法是制备纳米纤维非常普遍的方法, 应用范围非常广泛, 可以制备氧化物、金属、半导体、导电高分子等材料的纳米纤维。主要分氧化铝模板法、聚合物模板法和表面活性剂模板法。

氧化铝模板法是将多孔氧化铝模板固定到基底电极上, 置于电解液中, 根据所制备材料选择合适的电沉积电位, 把金属、合金以及金属氧化物沉积到孔中就得到排列整齐的纳米纤维<sup>[14]</sup>。杨友文<sup>[15]</sup>等人通过氧化铝模板法以 NaOH 腐蚀模版制备得到直径在 60 nm 的氧化铝纳米纤维。

聚合物模板法制备纳米纤维的原理与氧化铝模板制备纳米纤维的原理相似, 根据电沉积, 将金属、合金以及金属氧化物沉积到具有纳米孔洞的聚合物模板中得到排列整齐的纳米纤维, 再将聚合物烧结分解形成纳米纤维。于景媛<sup>[16]</sup>等人用发泡聚苯乙烯 (PS) 小球排序成模板, 再将铝盐溶液倒入模板, 通过离心成

型，再将PS模板烧结得到氧化铝纳米纤维。

表面活性剂模板法制备纳米纤维是将表面活性剂的亲水基和疏水基的浓度调节到胶束浓度以上，表面活性剂通过范德华力或静电力结合形成胶束，然后所需制备的材料沿着胶束的内部或者外部生长，再将胶束去除形成纳米纤维。目前这种方法是模板法制备氧化铝纳米纤维最常用的方法。Li<sup>[17]</sup>等人在 $\text{AlCl}_3$  和十六烷基三甲基溴化铵（CTAB）的混和溶液中，滴加氨水进行沉淀，然后转移到高压釜中，加热到200 °C保温6小时，制备出平均直径为10 nm、长度为150-250 nm的氧化铝纳米纤维。

模板法制备的氧化铝纳米纤维直径细小，并且可以对纤维的直径进行很好控制，但制备过程中的腐蚀过程及沉积过程难以控制，表面活性剂的分子结构、电性和价态对纤维的成型和形貌有很大的影响，制备成本昂贵，难以实现工业化生产。

### 1.2.3 液相法（Liquid phase method）

液相法制备氧化铝纳米纤维通常是选择一种或者几种可溶性铝盐，按成分量配成溶液，使各元素呈离子或分子态，然后经过不同方式得到氧化铝纤维。液相法按溶液的状态主要分为水热法和溶胶-凝胶法。

#### （1）水热法（Hydrothermal method）

水热法是指在特制的密闭反应器（高压釜）中，采用水溶液作为反应体系，通过对反应体系加热、加压，创造一个高温高压的反应环境，使得物质重结晶而进行无机合成的一种方法。

水热法制备氧化铝纳米纤维过程主要如下：

- 1、将铝的先驱体在水热介质中溶解，形成离子或分子团；
- 2、升温过程中，密闭反应器的溶液的上部和下部存在温度差，釜内溶体会产生强烈的对流，导致离子或分子团偏向于向低温区聚集，形成铝盐的过饱和溶液；
- 3、过饱和溶液区域，离子或分子团在有籽晶的生长界面上生长结晶，形成纳米纤维。

Ma<sup>[18]</sup>等人通过水热法制备得到了 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米纤维。将NaOH溶液滴入 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶液至特定pH值,加入表面活性剂烷基苯磺酸钠(SDBS),在200 °C下保温24 h,反应完成后即将产物取出洗涤,在500 °C下煅烧得到 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米纤维。热水法制备氧化铝纳米纤维简单方便,但生产效率低。

## (2) 溶胶-凝胶法 (Sol-Gel)

溶胶-凝胶法是目前制备氧化铝纤维的一种新方法,通常是以铝的醇盐或无机盐为原料,加入其他有机酸络合剂,溶于醇/水中得到混合均匀的溶液,经醇解/水解和聚合反应得到具有三维网络结构的均匀溶胶,溶胶经浓缩达到一定粘度后进行纺丝,凝胶素丝经干燥后得到前驱体凝胶纤维,最后经热处理即得到氧化铝纤维,或将溶胶在压力条件下脱水浓缩,得到一定的成纤胶体,将成纤胶体经过一定时间的热处理,得到具有多晶结构的纳米纤维。曹凯<sup>[19]</sup>人以硝酸铝为铝源,乳酸为络合剂,制备出具有一定粘度的湿凝胶,用玻璃棒进行拉丝得到凝胶素丝,素丝经过干燥预处理和1200 °C热处理得到 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米纤维。溶胶凝胶法制备纳米纤维效果是比较明显的,若是将上述成丝的方法拉丝法改用**静电纺丝法 (Electrospinning)**,再适当调节溶胶的性能,可制备出直径小于100 nm、直径分布均匀、长径比大、比表面积高的氧化铝纳米纤维。

## 1.3 静电纺丝法 (Electrospinning method)

2002 年韩国全北大学 Kim<sup>[19]</sup>研究小组首先将静电纺丝法应用于无机材料的制备,并合成出  $\text{SiO}_2$  纳米纤维,此后研究者用这种方法已经成功制备出几十种无机微米/纳米纤维,包括氧化铝纳米纤维。如 Larsen<sup>[1]</sup>等将仲丁醇铝溶解在无水乙醇中,用盐酸作为水解助剂,得到氧化铝醇溶胶。将醇凝胶浓缩到适合浓度,后经静电纺丝得到直径约 200 nm 的纳米纤维。采用溶胶-凝胶结合静电纺丝法制备氧化铝纳米工艺简单,成本低,易于实现工业化生产,所以本文选择此方法制备氧化铝纳米纤维。

静电纺丝(Electrospinning)技术是一种能够直接、连续是制备纳米聚合物纤维的一种方法<sup>[20-23]</sup>。静电纺丝技术由电喷技术演化而来,电喷技术起源比较早,可以追溯到 1880 年, Rayleigh<sup>[24]</sup>开拓了雾滴静电化研究,但并没有实际性的应用



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库